

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	21 (1930)
Heft:	5
Artikel:	Transmission de force motrice à grande distance par courant continu à haute tension
Autor:	Thury, René
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1058251

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de
l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A-6.
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et
sans indication des sources

XXI. Jahrgang
XXI^e Année

Bulletin No. 5

März I 1930
Mars I

Transmission de force motrice à grande distance par courant continu à haute tension.

Par René Thury, Dr. h. c., ingénieur, Genève¹).

Dans la conférence qu'on va lire, l'auteur du système universellement connu auquel il a donné son nom commence par faire l'historique des transports d'énergie sous forme de courant continu. Il pose ensuite la question: Comment générer et transformer le courant continu à haute tension (c. c. h. t.) nécessaire aux très longues transmissions, et cela au triple point de vue technique, économique et sécurité d'exploitation? Reprenant un à un ces divers aspects du problème, le conférencier parle de la génération du c. c. h. t. par conversion du triphasé avec transformateurs et redresseurs, puis au moyen de la commutatrice, du «transverter Highfield» et enfin par génération directe avec la dynamo haute tension. Il insiste spécialement sur ce dernier mode de génération et réfute les diverses objections qui lui sont faites: complexité du service, nombre et petitesse des unités, inconvénients des collecteurs haute tension, isolation du bâti des machines. L'auteur passe ensuite à la transformation du c. c. h. t. en alternatif par «transverter Highfield» et groupes convertisseurs, donne d'intéressants détails sur les dispositions nécessaires pour la mise en série de plusieurs unités à haute tension, explique la mise en ou hors service des machines et souligne les avantages de l'emploi de la terre comme conducteur effectif. Il exprime en terminant la conviction que le courant continu à haute tension n'a pas dit son dernier mot et entrevoit par ce moyen un fructueux développement des transports à très grande distance.

621.315.052.5
Der Autor, Schöpfer des unter seinem Namen bekannten Gleichstrom-Kraftübertragungssystems, gibt eingangs einen geschichtlichen Überblick über die Entwicklung der Gleichstrom-Kraftübertragung und stellt die Frage: Wie kann der für sehr lange Kraftübertragungen notwendige hochgespannte Gleichstrom erzeugt und umgeformt werden? Er behandelt die Frage der Erzeugung von hochgespanntem Gleichstrom mittels Umformung des Drehstromes durch Transformatoren und Quecksilberdampfgleichrichter, mittels Einankerumformer, mittels «Highfield-Transverter» und endlich die direkte Erzeugung durch Hochspannungs-Gleichstrommaschinen vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt aus, ferner hinsichtlich der Betriebssicherheit. Besonders eingehend betrachtet er den Fall der direkten Erzeugung und widerlegt die Einwände, die dagegen erhoben werden können: Kompliziertheit des Betriebes, Zahl der notwendigen und relativ kleinen Leistung der Maschineneinheiten, Störungen an den Hochspannungskollektoren und Isolierung der Maschinengestelle. In ähnlicher Weise betrachtet der Autor sodann die Umformung des hochgespannten Gleichstroms in Drehstrom und macht interessante Angaben über das Inserieschalten mehrerer Hochspannungsgruppen, erklärt die In- und Ausserbetriebnahme der Maschinen und unterstreicht die Vorteile der Anwendung der Erde als Leiter. Der Autor ist überzeugt, dass dem Gleichstrom für die Uebertragung elektrischer Energie auf sehr grosse Distanzen noch ein weites Feld offen steht.

Il peut paraître fort singulier et peut-être hors de propos de parler de transport d'énergie par courant continu à très haute tension, en cette année 1930 qui consacre l'universalité de l'adoption du triphasé et sa prodigieuse diffusion dans

¹⁾ Ce travail a été présenté en allemand dans ses traits essentiels par M. le Dr. K. Sulzberger le 25 janvier 1930 au jubilé de l'Elektrotechnischer Verein à Berlin, conférence qui a été publiée dans l'E. T. Z. 1930, No. 4, p. 114.

le monde entier. Que vient faire dans cette fête cet ancêtre qu'est le continu? N'est-il pas définitivement tombé dans l'oubli et y a-t-il vraiment lieu de rappeler sa mémoire?

Vous n'en avez pas jugé ainsi, et certainement vous avez bien agi en faisant au courant continu l'honneur d'une discussion. Mais malheureusement l'homme que vous avez choisi pour introduire le sujet est loin de pouvoir répondre à votre très légitime attente. Comme le continu, il est vieux, et comme les vieillards, il ne peut porter l'étendard qu'avec tremblement et non pas, comme il convient, d'une main ferme. Vous me comprendrez en apprenant que j'ai fait mes premières armes en entrant dans la construction en 1874, voici quelque 55 ans, à l'époque où Siemens étudiait son induit en forme de navette et le transformait en lui adjoint avec bonheur le collecteur de Paccinotti. On n'avait aucune idée nette de la notion du circuit magnétique et l'on ne disposait pas encore d'unités permettant le calcul des dynamos; chacun en établissait pour ses besoins et le gâchis n'a cessé qu'à partir du Congrès de 1881 à Paris.

Je suis donc un des trop rares témoins de la naissance de l'industrie électrique, ayant participé modestement à son développement ultérieur. Il me serait ainsi plus facile de parler à l'intention des jeunes ingénieurs de l'histoire des débuts difficiles de cette industrie que de soutenir une thèse, même sur un sujet familier. Je vous prie donc de m'accorder toute l'indulgence que je sollicite de vous pour les lignes qui suivent.

Historique.

Avant 1890, on ne connaissait encore en dehors du courant continu, et très imparfaitement, que le courant alternatif monophasé. Le triphasé était dans les langes de la première enfance. Jeune technicien d'une Maison de construction de Genève, j'avais, dès 1883, réalisé successivement plusieurs transports de force en continu et le succès de ces installations fut un encouragement à faire mieux encore.

Aussi, lorsqu'en 1887, si je me rappelle bien, un Ingénieur Génois du nom de Preve vint me voir à Genève pour me soumettre l'idée d'un véritable transport de force devant distribuer aux industriels d'une partie de Gênes, de Sampier d'Arena et de la Vallée de la Secca, je me suis mis avec ardeur à l'étude d'un système permettant de résoudre ce problème alors nouveau. Une installation d'essai fut équipée à Isoverde, village industriel à 27 km de Gênes, au moyen de 2 génératrices développant une tension variable n'excédant pas 2200 V sous 45 A et alimentant de force motrice divers moulins et fabriques.

Dès le début, les résultats furent satisfaisants et le développement fut décidé. Ce développement s'étendit assez rapidement à la totalité de la force hydraulique alors disponible, force bien modeste qui, néanmoins, grâce à une extrême économie dans la construction de 2 centrales et de la ligne et aux frais d'exploitation minimes, rendit pendant un quart de siècle environ bien au-delà de ce qu'on avait escompté. La tension totale ne dépassait guère 12000 V sous 45 A constants.

Un certain nombre d'installations furent mises en service dans l'espace de temps nécessaire à l'adolescence du triphasé, dont le développement fut, comme chacun de vous le sait, de plus en plus rapide grâce aux travaux scientifiques d'une pléiade de savants et grâce aux incessants perfectionnements apportés par les constructeurs.

Le continu fut alors peu à peu délaissé au point qu'aujourd'hui beaucoup en ignorent complètement la survivance, qui pourtant est réelle.

Plusieurs installations ont été transformées en triphasé pour motif d'unification et d'intercommunication avec les réseaux normaux. D'autres subsistent encore mais seront certainement transformées d'un jour à l'autre. Une seule installation s'est notablement développée et est encore en voie d'agrandissement, quoique le circuit continu soit en quelque sorte incorporé à un vaste réseau triphasé dont il est le soutien et le régulateur.

Cet abandon du courant continu est justifié en ce qui concerne le transport d'énergie aux distances courantes. Le continu haute tension est en effet impropre à la distribution générale, tout au moins sous sa forme actuelle (voltage variable, intensité constante). Il ne peut pas être transformé en basse tension continue ou alternative sans l'aide de machines tournantes, convertisseurs, moteurs-générateurs ou „transverters Highfield“, qui sont loin de présenter la simplicité et la robustesse des transformateurs alternatifs.

Je ne conçois donc l'emploi du continu que pour les transmissions de force à très grande distance, par exemple au-delà de 500 km, car il est établi qu'il peut franchir des distances supérieures à 1000 km dans des conditions de sécurité et d'économie tout à fait remarquables, alors qu'à ces distances les lignes triphasées sont vraiment trop coûteuses et ne se justifient plus, ni techniquement, ni financièrement. Je considère aussi, après expérience prolongée, que le continu, ne causant aucune fatigue aux diélectriques des câbles souterrains et ces derniers pouvant être construits économiquement pour supporter en toute sécurité même plusieurs centaines de kilovolts entre âme et enveloppe, peut seul permettre la suppression des lignes aériennes d'interconnexion constituant certains superréseaux et leur remplacement par des câbles souterrains.

En outre, les propriétés particulières des génératrices de courant continu haute tension permettent la solution de plusieurs problèmes de grand intérêt, tels que l'utilisation de la marée et celle des chutes très variables. Citons comme exemple le cas des barrages de retenue d'eau pour irrigation. Je pense en ce moment au barrage d'Assouan²⁾). En effet, le continu permettrait de transmettre encore une puissance utile très intéressante alors que la chute ne serait plus que le huitième ou le dixième seulement de la chute maxima, car turbines et dynamos ne sont pas asservies à une fréquence déterminée. Il en résulte que chute et nombre de tours peuvent à chaque instant rester en parfait accord correspondant toujours au rendement maximum. Vous savez que les alternateurs ne pourraient se plier à cette exigence que par le moyen d'engrenages intermédiaires à rapports variables, solution que personne ne voudrait appliquer aux génératrices d'une grande centrale. De même, pour l'utilisation des marées, les génératrices continues seraient capables d'utiliser les derniers kilowatts disponibles avant l'étalement et le calcul montre que le surplus de kilowatts-heure ainsi utilisé est très loin d'être négligeable et peut à lui seul justifier une installation de marée qui, sans cela, serait à abandonner parce que trop coûteuse par kWh utilisable.

Je ne parlerai pas des cas spéciaux, ni du continu à tension moyenne pour traction, 1500 à 3000 V, je m'efforcerai seulement de vous faire part du résultat de mes expériences et vous exposerai comment ont été résolus les problèmes que posent la génération et la transformation du continu à haute tension, afin que les intéressés ici présents puissent en discuter profitablement. Je n'insiste pas sur les avantages propres au continu au point de vue des lignes aériennes et câbles. Ce point a déjà fait l'objet de recherches qui vous sont certainement connues et dont la conclusion est la grande supériorité du continu. Il me suffira de vous signaler que le transport de force de Moûtiers à Lyon (France), mis en marche en 1906, a confirmé cette supériorité.

En 1906, le circuit du M.-L. avait une longueur totale de 360 km sous 50 à 58 kV, dont 8 km de câbles pour la pénétration dans la ville de Lyon. Ce tronçon souterrain n'a jamais eu la moindre avarie. Depuis un certain nombre d'années, la tension a été augmentée à environ 100 kV et, depuis lors, de nouvelles machines permettent d'atteindre environ 125 kV et le circuit dépasse 448 km dont 72 km en câbles souterrains. Nous n'en sommes donc plus à la théorie pure; la pratique s'est prononcée dans le même sens.

²⁾ Voir la conférence de M. Rutgers sur l'Etat actuel de l'électrification en Egypte et ses perspectives d'avenir, Bulletin de l'A.S.E. 1929, No. 18, en particulier les renseignements sur le projet d'Assouan, pages 608-609.

En admettant donc que la production d'un courant continu à haut voltage puisse être obtenue industriellement et que la transformation d'un tel courant puisse s'effectuer sans inconvénients techniques et économiques majeurs, il n'y aurait plus de doute: le continu s'imposerait chaque fois que la distance à franchir s'opposerait à l'emploi du triphasé par suite du coût élevé des lignes et pour d'autres inconvénients d'ordre technique.

La discussion peut donc s'établir sur ce thème: Comment générer et transformer le continu haute tension nécessaire aux très longues transmissions, et cela au triple point de vue: technique, économique et sécurité d'exploitation?

Je vais essayer d'apporter dans le débat les quelques pierres récoltées le long du chemin de mon expérience personnelle, vieille de plus de 50 années, pierres qui seront peut-être de quelque utilité pour la construction de l'édifice.

Génération du courant continu haute tension.

La technique moderne dispose de plusieurs moyens:

- a) Conversion du triphasé par transformateurs et redresseurs à vapeur de mercure.
- b) Commutatrice.
- c) „Transverter Highfield“, dont l'origine est l'appareil Hutin & Leblanc, appelé par ce dernier „Panchahuteur“.
- d) Génération directe par dynamo à haute tension.

Dans tous ces cas, nos connaissances actuelles nous obligent à la mise en série des appareils transformateurs ou générateurs, pour la raison simple qu'il n'est pas possible de construire ni redresseur à vapeur de mercure, ni commutatrice, ni „transverter“, ni dynamo, capables de supporter le nombre respectable de kV requis par l'économie de longues lignes de transport. Mais fort heureusement cette mise en série ne présente pas de difficultés insurmontables, loin de là. Elle est applicable aussi bien au potentiel constant qu'à l'intensité constante. Ceci dit, passons en revue ces divers moyens.

a) Convertisseurs à vapeur de mercure.

J'ai consulté en son temps M. M. Brown, Boveri & Co. à Baden pour savoir si l'on pouvait introduire ces appareils en série sur un circuit à courant continu dont la tension s'élevait à cette époque entre 75 et 100 kV et qu'il aurait été avantageux de développer par transformation d'une partie de l'énergie disponible en triphasé dans la même région. Le résultat très résumé de nos études a été celui-ci: Rien ne s'oppose à la mise en série, par le côté courant continu, d'un certain nombre de convertisseurs à vapeur de mercure. Chaque convertisseur est alors alimenté individuellement par un transformateur approprié dont le secondaire doit être fortement isolé, comme s'il donnait la tension totale prévue en courant continu. Par exemple, dans le cas envisagé, la tension entre ligne et terre devait s'élever normalement à 125 kV continus et les transformateurs devaient donc pouvoir éventuellement supporter $\frac{125}{\sqrt{2}}$ kV = 88 kV alternatifs. MM. B. B. C. n'y voyaient aucun inconvénient et me donnèrent toute assurance à ce sujet.

D'autre part, les convertisseurs eux-mêmes devaient être isolés du sol. Mais cela ne présentait de même aucune difficulté spéciale, puisque le problème avait été pratiquement résolu depuis plusieurs années pour les génératrices et réceptrices placées en série sur ce même circuit.

Il y a lieu de noter que la mise en série de convertisseurs à vapeur de mercure a moins d'inconvénients que la marche en parallèle de ces mêmes appareils en cas de retour de courant par court-circuit intérieur. En effet, la mise en court-circuit intérieur et accidentelle d'un convertisseur ne provoque pas de retour du courant continu dans l'appareil lorsqu'un certain nombre d'unités sont en série sur le circuit général. Toutefois, ceci n'exclut pas toute possibilité de court-circuit intérieur du

courant alternatif lui-même, mais il est plus aisé de protéger chaque unité lorsqu'un retour en courant continu est exclu.

A cette époque déjà lointaine, MM. B. B. C. ne pouvaient pas encore garantir plus de 3 kV c. c. au plus par appareil. Leurs essais à l'usine avaient été poussés jusqu'à 6000 V et laissaient espérer un grand progrès ultérieur. Comme il fallait installer environ 30 kV, il aurait fallu au moins 10 unités en série et le coût d'une telle installation devenait déraisonnable puisqu'il ne s'agissait que de 4500 kW seulement.

Depuis ce temps, de grands progrès ont été le fruit du travail persévérant de MM. B. B. C. et d'autres constructeurs. Le coût de la conversion a été abaissé et n'est peut-être plus prohibitif. Néanmoins, si l'on considère d'un peu près l'économie et les avantages de ce genre de conversion, l'on ne peut que constater qu'il exige un gros matériel en transformateurs haute tension, appareils nombreux et convertisseurs. Pour obtenir quoi? Simplement pour pouvoir installer des unités génératrices triphasées au lieu de génératrices donnant directement à la ligne, sans aucune transformation, du courant continu. Il est certain que ces dernières sont notablement plus onéreuses que de simples alternateurs et que ceux-ci se construisent aussi puissants qu'il est utile. Je suis tout à fait d'accord. Je dois cependant constater que la suppression complète de l'usine de conversion économise un gros capital qui est supérieur à la plus-value des machines à courant continu. En outre, l'économie des pertes inhérentes à la conversion représente aussi un capital non négligeable. Enfin, je préfère une usine très simple, ne comprenant que des turbines et dynamos, à deux usines formant un ensemble complexe et exigeant plus de personnel.

Je n'exclus pas, malgré tout, l'emploi des redresseurs à vapeur de mercure; ils pourront rendre de bons services, surtout pour l'utilisation sur un circuit des excédents d'usines triphasées. C'est dommage qu'il ne soit pas réversible et ne puisse ainsi constituer un lien élastique facilitant les interconnexions.

b) Commutatrices.

Le couplage en série de plusieurs commutatrices alimentées chacune par transformateur indépendant est possible par le côté continu, ce qui permet en principe d'atteindre de hauts voltages sans dépasser les limites imposées par leurs collecteurs. Je n'ai pas une expérience personnelle suffisante me permettant de proposer une limite de voltage individuel d'une commutatrice et j'avoue que je serais extrêmement embarrassé si l'on me demandait d'établir une de ces machines pour une tension plus grande que 3000 V à 50 périodes p. s. Je n'y consentirais que si j'avais la liberté de choisir une fréquence à mon gré et celle-ci serait nécessairement très basse.

Ceci dit pour montrer de suite la complexité d'une station de transformation pour 150 ou 200 kV par commutatrice. Je n'insiste pas, car chacun le comprend sans autre et s'Imagine clairement ce que pourrait être un tel poste, tant au point de vue coût en capital d'exploitation qu'au point de vue des pertes d'énergie et de la manutention.

Du reste, il serait bien difficile, peut-être impossible, de réaliser le réglage exact de l'intensité à voltage variable. La commutatrice s'adapte à peu près bien seulement au réglage du voltage constant. Nous verrons plus loin que ce dernier n'est pas toujours l'idéal.

c) „Transverters Highfield“.

J'ai l'honneur d'avoir fait bonne connaissance avec l'auteur de cet appareil et d'avoir assisté à l'éclosion de cette invention. Le problème n'était pas nouveau pour moi, car j'avais fait une tentative de réalisation du principe du „transverter“ plusieurs années auparavant. J'avais eu d'autre part l'occasion de m'occuper du „transverter“ que MM. Hulin et Leblanc avaient installé à la Centrale de Rouen voici plus de 25 ans, chef-d'œuvre d'ingéniosité mais impossible à appliquer aux puissances supérieures à quelques centaines de kW, par suite des embarras multiples causés par une commutation défectueuse.

J'ai moi-même abandonné cette voie dès mes premiers essais et cela dès constatation que je n'étais pas maître de la commutation. Monsieur Highfield a certainement été plus heureux que moi. Je ne sais malheureusement pas s'il a solutionné radicalement ce point très difficile et s'il est par suite capable de construire des collecteurs marchant irréprochablement pour des intensités de l'ordre de plusieurs centaines d'ampères et à non moins de 10 000 V par collecteur.

Je remarque, à la suite de mes études personnelles, qu'il est nécessaire qu'un collecteur de „transverter“ marche *au moins aussi bien* que celui de la meilleure machine à courant continu munie de pôles de commutation tout à fait corrects. Car l'entretien d'un collecteur fixe est beaucoup moins aisé que celui d'une machine ordinaire. Un collecteur tournant peut être remis au rond et repoli sans aucune difficulté, aussi bien que s'il était monté sur un tour. Au contraire, le collecteur fixe est d'un centrage plus difficile. Il faut l'aléser sur place et son repolissage est loin d'être aussi facile qu'à l'habitude.

Pour ces motifs, il est nécessaire que la commutation reste parfaite à toutes les charges, sinon on ne peut parler de haute tension continue que pour de faibles débits et l'on court le danger de „flashing“.

En effet, j'ai pu autrefois obtenir 15 à 20 000 V d'un seul collecteur fixe bipolaire et de faible diamètre (40 cm si j'ai bonne mémoire). Et dans mes essais j'ai pu pousser jusqu'à 30 000 V sans aucun dommage. Mais il s'agissait de faibles débits, inférieurs à 1 A. Le „flash“ ne s'amorce alors que difficilement, mais dès que l'intensité disponible s'élève, le danger du „flash“ augmente rapidement d'abord, moins vite ensuite, et devient de plus en plus fâcheux à cause de sa nocivité. C'est la raison pour laquelle la tension moyenne entre lames du collecteur doit être abaissée. Tandis que l'on peut admettre 500 V entre lamelles du collecteur d'une petite machine de quelques dixièmes d'ampère, on est obligé de descendre au vingtième de cette valeur s'il s'agit de puissantes génératrices industrielles.

Ainsi donc, par suite de l'irréversibilité des redresseurs à mercure et autres sortes de soupapes, l'utilisation du continu à haute tension pour les grands transports est en majeure partie liée à l'existence nécessaire de collecteurs et, plus encore peut-être, à leur très bonne marche pratique.

Si nous supposons résolue la question de la commutation des collecteurs des „transverters Highfield“, alors seulement ces appareils apparaissent comme très intéressants en ce sens surtout que leur rendement est très élevé et qu'ils permettent d'envisager l'adoption du potentiel constant, comme en alternatif, alors que je n'ai réussi jusqu'ici que par l'adoption de l'intensité constante à réaliser d'intéressants transports de force en continu à haute tension.

Au point de vue de la génération du courant, il semble plus rationnel de laisser les collecteurs à leur place naturelle, c'est-à-dire comme partie intégrante des génératrices, puisque celles-ci peuvent être couplées en série aussi bien et mieux encore que les „transverters“ et puisque ces derniers n'évitent pas les difficultés de la commutation; bien plus, ils les augmentent certainement.

d) Génération directe du continu haute tension.

En principe, rien ne peut être plus simple et plus efficace que la génération directe. Elle est actuellement seule pratiquée, et le transport de force de Moûtiers-Lyon, en service depuis 1906, peut être considéré comme un cas typique constituant une belle expérience pratique du fait de son développement par étapes successives. La tension actuellement atteinte en service courant varie avec la charge jusqu'à 125 000 V, mais la Société exploitante en a prévu le développement jusqu'à 250 kV. Toutefois, depuis peu, la liaison du réseau triphasé de la Société avec d'autres réseaux français a été envisagée. Un super-réseau triphasé haute tension permettra cette interconnexion et il est bien possible qu'une des raisons d'être du circuit continu cessant d'exister, l'extension projetée ne devienne inutile. Mais il est également possible qu'après avoir reconnu l'immense avantage technique d'une liaison

élastique des différents réseaux, on ne reviennent plus tard à devoir développer à cet effet le continu pour le plus grand bien du fonctionnement général de l'interconnexion triphasée. Je souhaite à ce sujet que les Français évitent avec le plus grand soin toute politique de parti-pris et sachent prendre des dispositions purement objectives.

Je reviens à mon sujet. Une centrale à courant continu équipée pour le système série comprend un nombre d'unités en rapport avec sa puissance et le voltage attribué à chaque unité. Le voltage maximum prévu exige la marche en série de toutes les unités, sauf celles gardées en réserve. La puissance totale est alors utilisée. Aux autres charges on arrête les unités inutiles et le voltage est réduit proportionnellement à la puissance. Le service de l'usine est donc identiquement le même que celui d'une centrale triphasée normale, à cette différence près que l'on règle dans ce dernier cas le voltage constant et non pas l'ampérage, et que l'on proportionne le nombre d'unités en service à l'ampérage total pour le triphasé, au voltage total pour le continu.

Ceci rappelé pour mémoire, on constate que les deux genres d'usines se ressemblent beaucoup. L'usine continue, dans certains cas, sera équipée d'un nombre plus grand d'unités plus faibles. Par contre, on n'y trouvera aucun organe transformateur de la tension des génératrices; celles-ci sont reliées directement à la ligne. On remarquera aussi que les génératrices continues sont plus lourdes que les triphasées, parce que le collecteur, pour redresser une tension suffisamment haute, exige que les machines génératrices soient à basse fréquence, 12,5 à 25 périodes p. s. au plus. Cela seul permet d'envisager des tensions de l'ordre de 7500 à 12 500 V par collecteur.

Quelles sont les principales objections faites par la majorité des ingénieurs à l'adoption de la génération directe du continu haute tension?

- 1^o Service plus complexe.
- 2^o Unités trop faibles et, partant, trop nombreuses; résistance inductive trop élevée.
- 3^o Emploi de collecteurs à haute tension, danger de „flashing“ et nécessité d'isoler du sol les bâtis des machines.

Voyons ce que la pratique nous enseigne:

1^o *Service plus complexe.* Je ne le crois pas. Une station génératrice série ne comprend normalement qu'un seul circuit à régler et ce réglage est automatique. Le tableau général est inexistant: il se réduit à un seul panneau de contrôle comprenant un ampèremètre et un voltmètre, outre le compteur wattmètre et un ou deux enregistreurs (tension et intensité); aucun appareil à manœuvrer au tableau.

Le service est donc entièrement assuré par les mécaniciens chargés de la surveillance générale des turbines et dynamos. Ce service est un peu plus chargé que celui des alternateurs, par le plus grand nombre de collecteurs en marche; le nettoyage aussi peut être considéré comme occupant davantage les hommes.

Mais on peut observer qu'en pratique le personnel est très peu occupé; de fait, il n'est là que pour la surveillance et les manœuvres des unités. D'autre part, ces manœuvres sont des plus simples. Pas de mise en phase. On met en marche le moteur de l'unité. Dès sa mise en vitesse, on insère la génératrice en circuit après amorçage à l'intensité de régime. Quelques secondes y suffisent, ainsi que je l'ai contrôlé moi-même à St. Maurice. Il m'a fallu 15 secondes pour la mise en marche à pleine charge d'une unité et l'arrêt d'une autre; ce temps est pris surtout par l'ouverture de la turbine. Le personnel exécute la même manœuvre en 10 secondes. On ne fait pas mieux en triphasé, au contraire.

2^o *Unités génératrices.* Jusqu'ici la nécessité de l'adoption de fortes unités ne s'étant pas fait sentir, les installations en courant continu ont été de faible puissance. L'installation de Gênes comprenait 2 stations génératrices, hydrauliquement en série avec une 3^e petite centrale. Les deux premières ont été équipées de 4 turbines de 100 kW l'une. Rien d'exagéré dans ce cas. Nous trouvons en effet

3 unités en service et une de réserve dans chaque station. Si ce travail était à refaire, nous adopterions probablement 2 unités par centrale, plus une de réserve. Soit 150 kW par unité.

La dernière installation méritant d'être citée s'est développée très graduellement par l'utilisation successive de plusieurs modestes forces plus ou moins distantes les unes des autres. On a débuté à Moûtiers par 4 unités donnant 75 A seulement et 14200 V, soit par unité 1065 kW, tension totale 56800 V. Plus tard, par la mise en série de deux autres petites centrales, la tension a été portée à environ 100 kV et l'intensité a été doublée. Les 3 unités de la station de la Rozière font chacune normalement 18000 V \times 150 A, soit 2700 kW par turbine; tension par collecteur 4500 V.

Le développement suivant a été effectué au moyen d'unités plus puissantes encore et toujours bien proportionnées à l'importance de la force hydraulique disponible. Chaque turbine actionne un groupe de 3 machines montées sur bâti unique. Les induits sont séparables et interchangeables. Chaque collecteur donne 7500 V sous 150 A; la tension peut monter à 7800 V à pleine charge. L'unité donne donc 22500 V à 150 A, soit 3375 kW et 3500 kW à pleine charge de la turbine. Ainsi les dernières unités sont actuellement 35 fois plus puissantes que les premières, celles de Gênes. Mais, aujourd'hui, on considère qu'en matière transport de force à grande distance, d'aussi faibles unités sont absolument insuffisantes, et cela est très juste. Un transport de force à 1000 km et plus ne peut se justifier que si la force transmise paie largement la ligne nécessaire et bien d'autres choses avec. Pour payer de tels frais, il faut vendre un nombre respectable de kW et je ne conçois guère qu'une force de moins de 50000 kW puisse concurrencer avec fruit une usine thermique (sauf dans quelques rares cas), lorsque cette force est située à un millier de kilomètres du lieu d'utilisation.

Pourquoi les unités construites jusqu'ici n'ont-elles pas dépassé 3500 kW? La raison en est l'adoption d'un très faible ampérage, 150 dans le cas particulier, et ce chiffre correspond tout simplement aux données économiques du problème posé à l'époque. Aucune raison technique ne s'oppose à l'augmentation de l'ampérage.

Supposons par exemple une transmission de 60000 kW à 1000 km; le calcul montre qu'il faut admettre non moins de 300000 V, neutre à la terre, ou 150000 V, la terre utilisée comme retour. Malgré ce haut voltage, il sera utile d'admettre en ligne une perte relativement élevée, disons, pour fixer les idées, 20 % de la tension reçue, c.à.d. quelque 30 kV.

Nous aurons donc en continu $\frac{60000 \text{ kW}}{150 \text{ kV}} = 400 \text{ A.}$

Nos génératrices seront fixées par ce chiffre et par le voltage admissible par collecteur. Supposons un groupe à 2 collecteurs de 10 kV et 400 A. Nous aurons ainsi des unités de 8000 kW au nombre de $\frac{180 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} = 9$ unités pour la pleine charge de l'usine.

Admettons que nous ayons la possibilité d'installer des turbines de double puissance, c.à.d. de 16000 kW. Il suffira d'admettre deux groupes de dynamos en tandem, isolés l'un de l'autre, comme on le pratique dans 2 des usines du Moûtiers-Lyon. Pratiquement, nous admettrons 5 unités, plus une de réserve, à un voltage unitaire un peu plus bas en marche habituelle.

Mais que coûte la ligne à si bas voltage? Je rappelle ici que l'utilisation régulière de la terre permet, à égalité de poids de cuivre, d'abaisser de moitié le voltage; donc les 180 kV que nous admettons à la centrale pour la pleine charge sont l'équivalent de 360 kV à l'ordinaire, et ainsi le coût du cuivre au kW transmis à 1000 km n'est pas excessif.

La résistance du conducteur pour 20% admis = $\frac{30000 \text{ V}}{400 \text{ A}} = 75 \Omega$, donc pour 1000 km 0,075 Ω par km, c. à d. 244 mm² pesant $\frac{2284 \text{ t}}{60000 \text{ kW reçus}}$ soit 38 kg/kW.

Ce poids n'a rien d'excessif, loin de là.

Que serait la ligne ? Pratiquement, nous la décomposerions en deux fils de demi-section suspendus de part et d'autre des pylônes. Etant équipotentiels et réunis entre eux à chaque poste intermédiaire, un danger de court-circuit n'existe plus. La chute à terre par rupture est extrêmement rare pour des câbles de cette section. A moins de rupture des deux câbles d'une même section, le service n'est pas interrompu et peut se poursuivre sur un seul câble, l'autre devant être simplement isolé au moyen des sectionneurs par les deux postes de la section avariée.

Je ne crois pas qu'il soit possible de transmettre une force de cette importance par une ligne plus simple, plus sûre en exploitation et plus économique. Au point de vue des pertes par effet corona, il faut se rappeler que la tension moyenne supposée, soit 175 kV au milieu de la ligne, est l'équivalent d'une tension alternative de $\frac{175}{\sqrt{2}}$ = rond 125 kV et que les deux fils qui composent la ligne sont équipotentiels et à bonne distance du sol. En cuivre, le diamètre du câble est de 14 mm. Ces pertes seraient ainsi pratiquement négligeables, surtout si l'on emploie l'aluminium.

Ces considérations montrent qu'avec un voltage continu modéré et sans sortir des conditions actuellement connues, on peut réaliser, par une centrale de construction normale et le retour du courant par le sol, un transport économique à 1000 km et plus encore, sans obligation d'adopter un nombre d'unités génératrices exagéré puisque 5 à 10 y suffisent (que l'on utilise, ou non, la terre comme conducteur actif), suivant les exigences de la partie hydraulique.

Supposons maintenant qu'il s'agisse de doubler ultérieurement la puissance envisagée. On installera un nombre croissant de nouvelles unités, sans autre changement, sauf si l'on juge que le voltage ne peut être accru sans risques. Dans ce cas, l'on peut doubler l'ampèrage par couplage en parallèle des deux induits de chaque génératrice existante, ainsi que cela a été le cas pour Moûtiers-Lyon, et les nouvelles unités pourront être bobinées pour l'intensité nouvelle, soit, dans l'exemple cité, pour 800 A. Deux nouveaux câbles seront posés sur les mêmes pylônes ou sur d'autres.

Remarquons que les révisions et les réparations, changements d'isolateurs, etc. peuvent toujours être effectués en pleine marche par la mise à terre du ou des conducteurs intéressés, les conducteurs sous tension, de l'autre côté du pylône, étant trop éloignés pour offrir un danger pour le personnel.

Les nouvelles unités peuvent donc être de double puissance si cela était utile, puisque seul le voltage au collecteur est limité. Pour 800 A, la limite pratique de tension sur un seul collecteur étant arrêtée à 10 kV, chaque induit développerait 8000 kW et les deux groupes en tandem sur une seule turbine pourraient ainsi atteindre 32000 kW. Le plus souvent les constructeurs de turbines préféreront ne pas s'engager aussi loin par suite des nécessités d'accorder chute, puissance et vitesse.

Je ne donne ces chiffres que pour fixer au mieux les possibilités actuelles au point de vue puissance unitaire et montrer que le nombre des unités est fixé par le voltage que peut générer un induit et non du tout par la puissance totale de l'usine. L'ampèrage transmissible est fonction directe de la puissance hydraulique disponible et la puissance d'une unité est également proportionnelle à l'ampèrage puisque le voltage est limité. Le nombre d'unités en aucun cas ne peut être considéré comme nécessairement exagéré.

Chacun me demandera s'il n'est pas audacieux d'admettre 10 à 12000 V par collecteur. Ce serait en effet plus qu'audacieux, ce serait folie de proposer de tels voltages pour du continu si l'on devait employer tels quels les types standardisés normalement construits partout. Mais rien n'empêche de construire des machines adéquates. Aussi le problème a-t-il été résolu par plusieurs auteurs indépendants, dont la conclusion unanime a été que l'on pouvait aborder les 10000 V en toute sécurité à condition de rompre quelque peu avec la routine. Deux voies s'offrent, ayant chacune ses avantages propres et aboutissant au même résultat pratique.

La voie *la mieux connue* des constructeurs en général a été suivie par la Sté. Alsacienne de constructions mécaniques à Belfort, qui l'a étudiée avec le plus grand soin avec votre serviteur: les génératrices sont à très faible nombre de pôles (4 ou 6) et à grand pas polaire, nécessité par le grand nombre de conducteurs à loger dans les alvéoles du rotor. Ceci implique une forte induction transversale des plus nuisible. En conséquence, un enroulement compensateur est

judicieusement réparti sur les pièces polaires du stator et annule exactement le champ transversal. Des pôles de commutation à grand entrefer font le reste et assurent une bonne commutation aux différentes charges, depuis la marche en court-circuit jusqu'à la marche à plein voltage. Les épanouissements polaires sont très étendus et ne laissent entre becs polaires que la place normalement nécessaire au pôle de commutation. La courbe du champ inducteur n'est pas déformée. Le stator n'est pas excité en série comme à l'habitude, mais bien par une excitatrice faisant partie du groupe. Cette excitatrice est elle-même excitée séparément et munie d'un enroulement inversé en série avec la génératrice. Cet enroulement désexcitant est assez important et joue le *principal rôle comme régulateur d'intensité*. L'inducteur de l'excitatrice est spécial; il laisse large place pour ces deux enroulements. Tout le réglage se fait donc par l'excitation séparée de l'excitatrice; les variations du courant primaire se corrigent en grande partie d'elles-mêmes et le réglage est parachevé soit à la main, soit automatiquement, exactement comme dans le cas habituel de marche à voltage constant pratiqué dans toutes les centrales triphasées ou autres.

La stabilité du courant ne dépend plus du régulateur; la machine est auto-stable. Aucune inversion de polarité n'est possible, grâce à l'excitatrice primaire dont l'inducteur et le collecteur sont spécialement établis en vue d'éviter cette éventualité. L'induction mutuelle des deux enroulements du stator de l'excitatrice est compensée extérieurement par un transformateur afin de faciliter la rapide désexcitation des groupes en cas de court-circuit en ligne. Dans un pareil cas, le voltage de l'excitatrice s'inverse fortement et décroît ensuite jusqu'au moment où l'intensité s'est abaissée à sa valeur normale.

En cas de rupture du manchon d'accouplement, le groupe ralentit son allure et continue à tourner dans le sens normal.

On remarque que de telles machines ont une résistance inductive très faible, conséquence naturelle de l'exacte compensation du flux du rotor et de la complète suppression de l'enroulement inducteur en série.

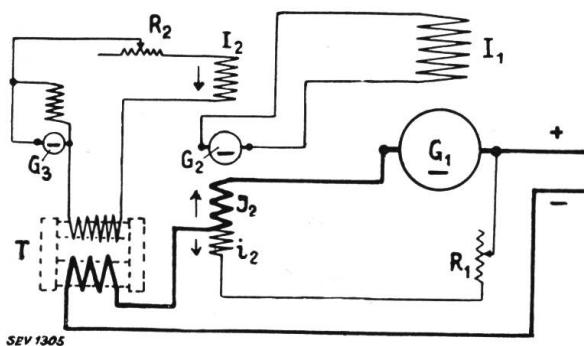


Fig. 1.

Schéma d'excitation de génératrices à courant continu à haute tension, système Thury.

- G_1 Génératrice à courant continu
- I_1 Excitation de G_1
- G_2 Excitatrice de G_1
- G_3 Excitatrice de G_2
- I_2 Excitation de G_2
- J_2 Enroulement série } alimentés par G_1
- i_2 Enroulement shunt } alimentés par G_1
- T Transformateur de compensation
- R_1, R_2 Résistances de réglage.

trice est spécial; il laisse large place pour ces deux enroulements. Tout le réglage se fait donc par l'excitation séparée de l'excitatrice; les variations du courant primaire se corrigent en grande partie d'elles-mêmes et le réglage est parachevé soit à la main, soit automatiquement, exactement comme dans le cas habituel de marche à voltage constant pratiqué dans toutes les centrales triphasées ou autres.

La stabilité du courant ne dépend plus du régulateur; la machine est auto-stable. Aucune inversion de polarité n'est possible, grâce à l'excitatrice primaire dont l'inducteur et le collecteur sont spécialement établis en vue d'éviter cette éventualité. L'induction mutuelle des deux enroulements du stator de l'excitatrice est compensée extérieurement par un transformateur afin de faciliter la rapide désexcitation des groupes en cas de court-circuit en ligne. Dans un pareil cas, le voltage de l'excitatrice s'inverse fortement et décroît ensuite jusqu'au moment où l'intensité s'est abaissée à sa valeur normale.

En cas de rupture du manchon d'accouplement, le groupe ralentit son allure et continue à tourner dans le sens normal.

On remarque que de telles machines ont une résistance inductive très faible, conséquence naturelle de l'exacte compensation du flux du rotor et de la complète suppression de l'enroulement inducteur en série.

Ceci est d'une grande importance au point de vue de la possibilité de production de surtensions en cas de brusque et importante variation d'énergie dans le circuit. Théoriquement, il ne devrait jamais se produire de surtensions, puisque le courant est constant par essence, le circuit jamais interrompu et que la charge statique des différentes parties du circuit ne varie que très lentement. Mais lorsque l'on ne se sert pas de la terre comme conducteur de retour, les lignes n'étant plus équivalentes, sont sujettes assez fréquemment à supporter des court-circuits partiels et quelquefois même directs. Ceci surtout pendant les saisons orageuses et en pays de montagnes. Dans ces cas, des vagues de courant se propagent et s'accusent par des surtensions soit au parafoudre, soit parfois aux bornes des inducteurs et des induits. Ces vagues sont naturellement fonction de l'énergie accumulée dans le circuit et cette énergie est elle-même fonction de la self générale du circuit. Il y a donc intérêt à réduire cette self et le meilleur moyen est bien d'abandonner l'excitation série et de lui préférer l'excitation séparée avec compensation complète du champ propre de l'induit.

Ainsi l'excitation séparée permet d'obvier d'une façon pratiquement radicale à une objection souvent formulée, à savoir que la *résistance inductive élevée* (self) des machines-série s'opposait au développement du système à cause des surtensions qui devaient inévitablement se produire dans certains cas. (Rappelons que le système série ne comprend aucun disjoncteur dans le circuit.)

De ceci, je vous laisse juges et vous prie de considérer ces deux cas.

1^{er} cas. *Le continu.* Normalement le courant est constant et ne s'inverse jamais. Il n'est jamais interrompu autrement que par l'arrêt graduel des génératrices ou rupture accidentelle de la ligne; les charges statiques varient proportionnellement à la puissance de l'usine c.à.d. très lentement. Les machines donnent un courant non ondulé: pas question d'harmoniques. La résistance des machines est presque purement ohmique.

2^e cas. *L'alternatif.* Pour la fréquence normale, 50 périodes p.s., la tension et le courant varient normalement de $2\sqrt{2} = 282\%$, 100 fois par seconde, ou, si vous le préférez, 8640000 fois chaque jour. Et machines et transformateurs, me semble-t-il, ne sont de même pas dépourvus de résistance inductive.

Lequel des deux risque-t-il le plus d'émettre des surtensions?

Revenons à notre sujet. J'ai dit plus haut que deux voies s'offraient pour la solution du problème de la génération directe du continu haute tension; je vous ai entretenus de la solution consistant en l'emploi de génératrices compensées, munies de pôles de commutation et excitées séparément par une excitatrice jouant le rôle de régulateur d'intensité.

Voyons la *seconde voie* actuellement en usage dans la plupart des centrales à haute tension continue. J'aurais dû la classer première.

Les génératrices sont équipées en série. Elles marchent soit à *vitesse variable*, le régulateur d'intensité agissant sur le distributeur de la turbine, soit à *vitesse constante*, le régulateur décalant plus au moins les balais.

Je laisserai de côté le premier système pour ne parler que du second, car on l'a préféré à l'autre dans les dernières centrales équipées.

Le réglage par décalage de balais a surpris beaucoup d'ingénieurs lorsque je l'ai introduit sur le réseau de Zoug d'abord, en 1897, puis, peu après, sur le circuit „série“ des villes de La Chaux-de-Fonds et du Locle. Il était alors difficile de comprendre comment il pouvait être possible de marcher sans étincelage à toutes les charges et à intensité constante. La chose est cependant très simple et chacun en saisira le mécanisme en sachant que l'inducteur tout entier est simplement considéré et calculé comme n'étant formé que des pôles de commutation. On peut donc dire sans se tromper que ces génératrices (ou réceptrices) sont des machines ordinaires à pôles de commutation, dont on a supprimé les pôles principaux et développé d'autant les pôles de commutation.

Par le choix de justes proportions et d'entrefers relativement grands, on arrive à d'excellents résultats pratiques. Au point de vue du réglage (vitesse pour les moteurs, intensité pour les génératrices), on ne saurait trouver mieux et l'on arrive à une précision et une sensibilité sans égales. En effet, la constante de temps des inducteurs ne joue plus aucun rôle et l'obéissance au régulateur est instantanée, ce qui facilite grandement le réglage. Quatre des centrales du Moûtiers-Lyon sont pourvues de ce système; une autre, celle de Moûtiers, marche selon le système de réglage par les turbines.

Tous ceux qui ont visité cette installation ont été frappés par la parfaite stabilité de l'intensité; aucune centrale à potentiel constant n'arrive à mieux et cela serait du reste inutile.

Aussi la Société a-t-elle conservé ce système pour ses nouvelles unités et celles-ci, fort heureusement, s'y sont parfaitement adaptées, grâce aux travaux de mon excellent ami et ancien collaborateur, Mr. Belli, qui a réussi à éliminer un défaut de ces machines, peu gênant tant que la puissance de ces unités ne dépasse pas 6 à 700 kW par collecteur, mais très fâcheux dès que l'on atteint et dépasse 800 kW.

Je veux parler ici de la distorsion du champ inducteur par réaction de l'induit. Dans les machines puissantes, mais à faible nombre de pôles, comme c'est le cas nécessairement pour les machines continues à haut voltage, l'induction dans la région d'un des becs polaires atteint une valeur si élevée qu'il en résulte plusieurs défauts graves: sursaturation des dents du rotor, courants parasites dans les barres, tension localement trop forte entre les sections du collecteur (augmentant le danger de „flash“), échauffement anormal du fer et des conducteurs. A cela s'ajoute une difficulté plus grande d'obtenir à toutes les charges une parfaite commutation.

Mr. Belli a construit le stator des nouvelles machines en logeant l'enroulement inducteur dans une série d'alvéoles disposées à la manière des stators des moteurs polyphasés. Il utilise la saturation des dents du stator pour limiter l'induction à une valeur raisonnable admise par avance. Le résultat de ce dispositif a été excellent. J'ai eu le plaisir de voir ces machines en service normal à 22000 V par groupe (7300 V par collecteur) à 500 tours/min., sans aucune trace d'étincelage. J'ai vu les mêmes machines marchant en court-circuit direct, à vitesse normale et intensité de régime (150 A) sans aucun étincelage. Pas davantage à 250 A, c.à.d. en sur-

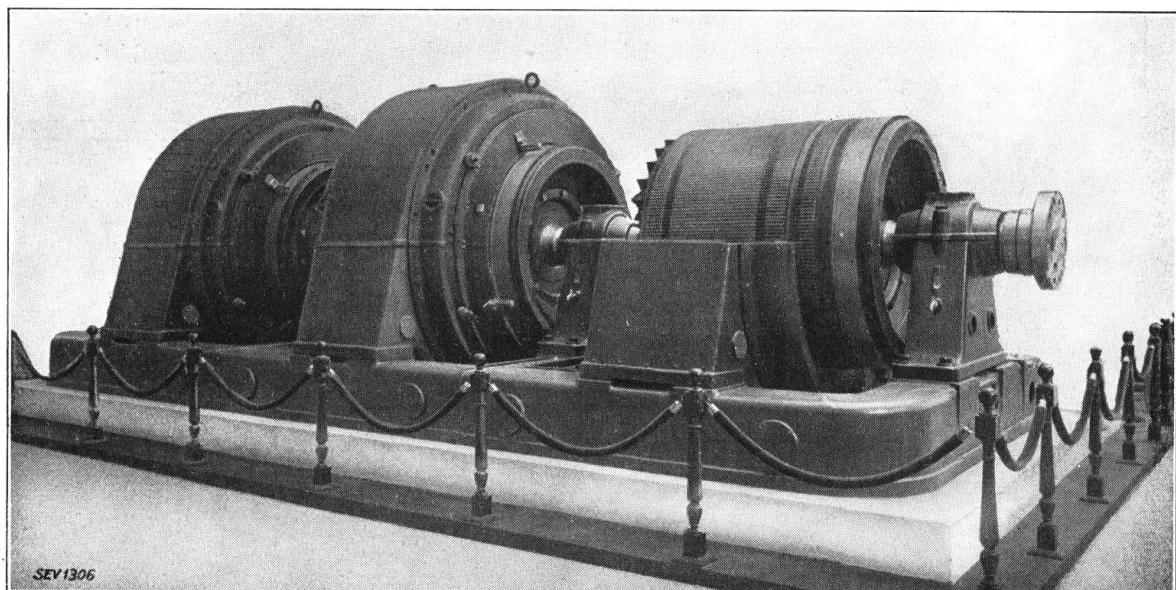


Fig. 2.

Groupe générateur à courant continu, haute tension, système Belli.

3500 kW, 150 A const., 3 × 7800 V, 500 t/m. Rotor: diamètre 148 cm, longueur 55 cm.
En service depuis 1927 pour le transport d'énergie Moûtiers-Lyon.

intensité de 67 %. L'échauffement en marche continue est resté notablement inférieur à la normale admise et le rendement calculé, 94 %, a été contrôlé avec soin et trouvé exact.

Il y a maintenant deux ans que ces machines assurent leur service et l'on a observé que leur tenue au collecteur, lors d'une série de mises à la terre d'une ligne défectueuse, a été excellente, meilleure même que celle d'autres machines à plus basse tension, soumises aux mêmes à-coups.

Ainsi la preuve est faite que la tension de 7800 V par collecteur (7200 en marche normale moyenne) n'est pas un obstacle à la marche régulière, commerciale pourrait-on dire, des génératrices et réceptrices à haute tension.

Mr. Belli aurait préféré, m'a-t-il dit, construire des dynamos pour 10000 V par collecteur, et grouper deux dynamos par bâti unitaire au lieu de trois. Mais la Société, pour des motifs de convenance particulière, lui a imposé 3 dynamos par unité. A mon humble avis, Mr. Belli avait raison.

Pourquoi, me direz-vous, préférez-vous l'emploi de machines compensées excitées séparément ? Le dispositif à décalage de balais, plus simple et bien éprouvé par une longue pratique, n'est-il pas préférable ?

Eh bien, quoique j'aie une tendresse particulière pour le système à décalage, que j'ai beaucoup travaillé et qui m'a souvent procuré de grandes joies, je préfère l'excitation séparée lorsqu'il s'agit d'usines génératrices puissantes. Voici pourquoi :

1^o Réduction considérable de la résistance inductive des enroulements, ceci a l'avantage d'une meilleure possibilité de protection des machines contre les surtensions atmosphériques et autres. Diminution des surtensions pouvant provenir de rapides changements de régime (mise à la terre d'une ligne, etc.).

2^o Auto-stabilité et auto-réglage; désexcitation très rapide en cas de court-circuit, sans nécessiter l'intervention de régulateurs et de disjoncteurs. (Lors d'un court-circuit en ligne, les machines excitées en série se surexcitent; celles excitées séparément par excitatrices fortement contre-compoundées se désexcitent, ce qui est plus correct.)

3^o Rendement meilleur à charge réduite et possibilité de marcher à pleine excitation en cas de réduction de la force hydraulique disponible, lorsque l'intensité doit être réduite en vue de la meilleure utilisation possible d'une force hydraulique variable. Nous avons déjà vu que ce point peut avoir une grande importance dans quelques cas intéressants.

A ces trois avantages, on peut en joindre un quatrième : Possibilité de construction de machines à plus haut voltage.

En effet, l'enroulement série compensateur évitant complètement la distorsion du champ inducteur, le champ reste homogène sous tout le développement des pièces polaires. Rien n'empêche alors de construire des machines de diamètre relativement grand, à faible nombre de pôles et basse fréquence alternative, parfaitement adaptées à la haute tension continue. Le seul inconvénient rencontré est le poids plus grand par kW. Au point de vue construction, on observe d'autre part que le prix de la main d'œuvre par kW n'augmente pas; il tend à baisser. Au total, il y a augmentation du coût au kW, mais je ne crois pas celle-ci prohibitive, surtout si nous tenons compte du fait que les usines à haute tension continue économisent complètement l'usine de transformation de basse en haute tension.

Je dois ajouter cependant que, pour ce qui concerne les réceptrices, le système à décalage de balais par machines Belli reste recommandable pour la commande des alternateurs. En cas de court-circuit direct en ligne, les réceptrices série se désexcitent automatiquement par le changement du sens du courant de ligne. De plus, ce système est celui qui se prête le mieux aux manœuvres de mise en parallèle des alternateurs.

3^o Collecteurs. L'obligation de munir les dynamos de collecteurs, organes assez coûteux et exigeant un certain entretien, a été pendant longtemps considérée, non sans raison, comme objection fondamentale. Il semblait impossible, du seul fait des difficultés et même des dangers de la commutation, d'arriver à obtenir la sécurité de marche nécessaire à l'exploitation fructueuse d'un grand transport d'énergie.

En fait ce sont bien de réelles difficultés de commutation aux tensions un peu élevées qui ont pendant longtemps limité le voltage individuel aux environs de 3500 V et qui ont assez souvent causé des arrêts de service lorsque l'on a passé de 3500 à 4500—5000 V. Ce sont pour une bonne part ces difficultés qui ont poussé Monsieur Belli dans la voie qu'il a suivie avec succès et qui a permis d'arriver à 7500 V et obtenir une sécurité de marche remarquable. La résistance complète aux coups de feu, souvent remarqués sur d'autres machines hors de courts-circuits ou mises à la terre accidentelles des lignes, est due à plusieurs améliorations dont les deux plus efficaces sont, d'une part, l'étendue plus grande de la plage à faible tension de part et d'autre des lignes de balais, d'autre part, l'abaissement de la tension maximum entre sections successives. Quoiqu'il en soit le progrès est très grand.

Non moins grands sont les résultats découlant de l'expérience pratique prolongée des fortes machines à courant continu construites par la Société Alsacienne de constructions mécaniques à Belfort. Il s'agit des génératrices et moteurs destinés à la commande directe des laminoirs réversibles de la grosse métallurgie. Ces machines sont jour et nuit soumises aux plus terribles épreuves de robustesse: en quelques dixièmes de seconde le courant passe de zéro à 10000 A et plus, le voltage subissant les mêmes variations de zéro à plus de 1200 V et quelques secondes après le courant s'inverse brutalement, stoppe le moteur en une fraction de seconde et le cycle, inversé, recommence. Les couples moteurs atteignent et dépassent 400 tonnes×mètre et le courant varie au taux de quelque 20000 A/sec. Les machines, excitées séparément, sont munies de la compensation de la réaction du rotor et de pôles de commutation, elles sont semblables aux machines proposées pour les grands transports d'énergie à courant continu de haute tension. Mais en réalité ces dernières ont à soutenir un service infiniment moins dur: variations lentes et peu nombreuses et courant constant permettant d'ajuster la commutation de façon parfaite. C'est grâce à ces circonstances favorables qu'il est possible aujourd'hui d'admettre en toute tranquillité 10000 V et plus. Il est plus facile, de fait, d'obtenir une marche parfaite d'une machine à 10000 V et 1000 A, dont le collecteur, par ses dimensions et le faible nombre de balais reste froid, qu'une machine à 10000 A et 1000 V dont le collecteur, balayé par un nombre de charbons dix fois plus grand, souffre beaucoup plus.

Mes observations personnelles me permettent de signaler un point dont l'importance ne me semble pas négligeable. Si les lignes de balais commutent dans un espace soumis à un champ magnétique, il peut arriver que le champ tende à chasser le courant hors contact pour peu que ce contact ne soit pas excellent; il y a intérêt à ce que les lignes de balais se trouvent assez éloignées des pôles inducteurs, dans une région aussi neutre que possible; à défaut, un écran magnétique (encartage par exemple) peut supprimer cet effet de soufflage magnétique dangereux. Un autre point, favorable aux hautes tensions, est que l'amorçage d'un arc par les balais est d'autant plus difficile que la vitesse périphérique du collecteur est plus grande, pour autant que les balais gardent le contact et qu'un champ n'intervienne pas. Ceci s'explique de la même façon que le jeu des interrupteurs ordinaires à courant continu. L'arc est d'autant plus court et peu nocif que la vitesse de coupure est plus grande.

L'économie de construction des génératrices à courant continu de haute tension est liée à la vitesse périphérique du collecteur; un porte-charbons plus ou moins

bien conçu, des charbons plus ou moins aptes à supporter la vitesse peuvent fortement influencer toute l'économie d'une application du système.

Monsieur Belli a tenu compte de ces observations lors de la construction de ses machines à 7500 V par collecteur. Cet organe est hors d'atteinte du flux de fuite des inducteurs. La vitesse périphérique du collecteur est de 39 m par seconde. Le porte-balai est bien adapté à cette vitesse et les résultats obtenus sont excellents. Le collecteur est ventilé naturellement dans la direction axiale: en cas d'amorçage d'arc, celui-ci serait repoussé extérieurement; les pièces du porte-balais sont protégées contre des arcs éventuels. L'expérience a montré lors de mises à la terre de la ligne, que l'étincelage inévitable à ce moment (mais de courte durée) ne laissait pas de traces nécessitant un arrêt et un nettoyage: les machines pouvaient continuer leur service. On n'a pas observé d'amorçage de balai à balai. L'échauffement du collecteur par les pertes de la commutation est négligeable: 0,08 % (900 watts); c'est l'air venant de la ventilation du rotor qui l'échauffe faiblement, 7 à 10° environ.

On a observé du reste qu'en général seule la ligne aérienne est responsable des arrêts de service. Un des chefs de station du Moûtiers-Lyon me disait un jour à ce sujet que si la ligne était entièrement en câbles souterrains il ne concevait pas pour quelles raisons il pourrait se produire un arrêt de service, car même l'avarie brutale d'une unité ne cause pas de perturbation pour peu que les génératrices en service disposent d'une réserve d'énergie suffisante. En effet, grâce au groupement en série, un court-circuit au collecteur n'intéresse que la machine avariée; dans le groupement en parallèle les coups de feu aux collecteurs sont au contraire aggravés par le courant provenant des autres unités.

En résumé, la présence des collecteurs ne constitue une objection sérieuse que si les points suivants — bien connus des bons constructeurs — ne sont pas suivis:

- 1^o Bonne commutation.
- 2^o Voltage moyen ne dépassant pas environ 30 à 35 V entre segments, ni 75 à 100 V/cm.
- 3^o Répartition aussi égale que possible de la tension entre les sections, ce qui veut dire que le champ doit rester homogène d'un bout à l'autre de l'entrefer polaire (compensation exacte), tout en ménageant une plage suffisante de part et d'autre de la ligne de commutation.
- 4^o Division exacte du sectionnement.
- 5^o Construction solide évitant les déformations par force centrifuge ou par d'autres causes.
- 6^o Vitesse périphérique raisonnable voisine de 35 à 40 m/s et ne dépassant pas 50 m/s à moins de disposer de meilleures qualités de charbons que celles actuellement disponibles.
- 7_o Isolement des sections de 1,2 à 1,8 mm très régulier. J'ajouterais encore:
- 8^o Eviter que les lignes de balais soient coupées par un champ magnétique, et disposer d'une bonne ventilation axiale chassant au dehors, loin du rotor, les poussières du collecteur et les arcs qui pourraient prendre naissance accidentellement, comme par exemple par bris de charbon ou par accidents en ligne.

Transformation du courant continu à haute tension.

Nous avons vu que le continu haute tension pouvait être généré directement au moyen de dynamos appropriées et couplées en série. Moyennant quelques complications, il peut être le résultat de la transformation du triphasé, soit par redresseur à vapeur de mercure, soit par commutatrice, soit aussi par le „transformer Highfield“.

Nous savons que ce courant peut être transmis avec une facilité particulière, soit par lignes aériennes, soit mieux encore par câbles souterrains isolés au papier

imprégné. Nous savons aussi qu'il permet d'utiliser la terre comme conducteur actif et que les pertes des lignes se réduisent pratiquement à la chute ohmique, la capacité ne jouant aucun rôle en marche normale et le courant se répartissant également dans toute la section du conducteur. Pas question d'effet pelliculaire et pas de réaction du courant de capacité sur les génératrices. Et l'influence de la perte ohmique en ligne est très favorable à la stabilité du courant et facilite son réglage.

Nous savons aussi que la situation des postes de transformation, qu'ils soient installés près des génératrices, le long de la ligne ou à l'extrémité de celle-ci, est sans aucune influence sur la marche des appareils transformateurs. En effet, dans un circuit série le courant est le même dans toutes les parties.

Comment peut-on transformer le continu en formes usuelles propres à la distribution générale c.à.d. presque toujours triphasée? Jusqu'ici seulement par appareils rotatifs. Je ne connais pas d'autre issue. Le redresseur à vapeur de mercure est irréversible, donc exclu. La commutatrice pourrait à la rigueur être utilisée, mais des difficultés se présentent que je n'ai pas été capable de surmonter et je ne connais aucun exemple d'application sur circuit "série".

Le „*transverter Highfield*“ mérite une mention à part. Il peut transformer le continu en alternatif et cela certainement à bon rendement. J'ai échoué quand je l'ai essayé autrefois, mais Mr. Highfield a eu beaucoup de bonheur dans ses essais sur puissance modérée (400 kW à 100 kV continus) puisqu'il a réussi en tout cas un essai de 15 mois d'après une communication faite en septembre 1922 à l'„Institute of Transport“. Depuis lors, je suis resté sans nouvelle aucune de Mr. Highfield et de son système.

Si je ne m'abuse, la transformation du courant alternatif par „*transverter*“ exige une tension constante du continu. On ne peut pas transformer le continu d'intensité constante en tension constante alternative et, à ma connaissance, Mr. Highfield ne l'a jamais proposé.

Donc la station génératrice devra nécessairement être équipée comme d'habitude pour potentiel constant.

Si l'on désire éviter la transformation primaire, ce qui est très légitime, les génératrices en service devront toujours être en nombre suffisant pour pouvoir produire la haute tension continue, soit au moins par groupe de 10 unités à 10000 V pour chaque 100 kV, même si le circuit est tout à fait déchargé. C'est un inconvénient que Mr. Highfield évite en utilisant son „*converter*“, aussi bien à la station centrale qu'il équipe en triphasé, qu'aux postes convertisseurs. Et toujours il sera nécessaire de garder en mouvement la totalité des „*converters*“ nécessaires au haut potentiel constant à maintenir sur le réseau. Sur ce point, je reste un peu sceptique, sachant la difficulté d'une commutation dont on n'est pas maître et qui varie avec le débit. Je lui préfère celle d'une bonne génératrice normale, munie de pôles de commutation efficaces à toutes les charges.

Ce que je retiens de plus intéressant dans la conférence de Mr. Roger T. Smith³⁾, ce sont les avantages qu'il signale au point de vue de la traction d'abord, puis au point de vue de la marche en parallèle de plusieurs réseaux triphasés interconnectés par l'intermédiaire du continu, donc par un lien élastique ne tenant pas compte de la fréquence individuelle de chaque réseau et permettant cependant les échanges d'énergie sans troubles. Ceci a été et est encore pratiqué au poste de Lyon de la Sté. Générale de Force et Lumière et j'ai remarqué avec intérêt avec quelle facilité un des réseaux triphasés, surchargé momentanément et dont la fréquence était descendue bien au-dessous de la normale, pouvait être néanmoins couplé en parallèle avec les autres, par l'intermédiaire du continu, *sans aucun avis donné aux centrales*, du reste éloignées de plus de 100 km. Il n'y a aucune difficulté à cela, du fait de la souplesse, de la réversibilité et des facilités d'accrochage que donnent les moteurs générateurs continu-triphasé du poste de Lyon.

³⁾ Voir Journal of the Institute of Transport, vol. 3, No. 5, juillet 1922 (Meeting of Mai 8th 1922).

En résumé, pour ce qui concerne le „transverter Highfield“, je l'entrevois comme une possibilité intéressante par son haut rendement et j'attends de voir en marche correcte et sans étincelage les groupes puissants qui ont été annoncés par Mr. Smith.

Groupes convertisseurs.

Actuellement, dans toutes les installations encore en marche la transformation s'opère par groupes moteurs-générateurs. Aussi bien le problème, tel qu'il m'a été posé à l'origine, subsiste et se résume en quelques mots: *Obtenir par transport électrique la force motrice la plus économique.* Si, dans une centrale triphasée, vous pouvez entraîner vos génératrices à meilleur compte avec un moteur électrique qu'avec un moteur thermique, vous êtes satisfaits et n'hésitez pas à assurer la plus grande part de votre service par moteurs électriques, n'utilisant les moteurs thermiques que pour franchir les pointes et comme réserve.

La transmission directe de génératrice à réceptrice, sans l'intermédiaire de postes élévateurs et réducteurs de tension, la ligne la plus simple et la plus économique, l'usage éventuel de la terre, arrivent à ce résultat final que le kW transmis coûte moins, *pour les grandes distances*, en continu qu'en triphasé. Il ne faut actuellement pas demander davantage.

Le temps et la place mesurée ne me permettent pas d'entrer dans beaucoup de détails sur la transformation mécanique du continu haute tension. Chacun peut s'en faire une idée assez claire. Quelques détails cependant sur les moteurs continus.

Jusqu'ici on a adopté, pour le moteur, le même type et les mêmes dimensions que pour les génératrices, à ce point que l'on pourrait interchanger les machines, si nécessaire.

Comme les génératrices, les moteurs sont isolés du sol pour la tension totale et la surface du sol est revêtue d'une épaisseur d'environ 5 cm d'asphalte recouverte elle-même d'un dallage isolant ou aussi d'un simple linoléum. Les hommes de service peuvent ainsi toucher et manœuvrer les machines, comme si elles étaient reliées à la terre.

Chaque groupe convertisseur est réglé par un régulateur de vitesse très précis et adapté à la marche en parallèle des alternateurs. Ce réglage agit sur le décalage des balais et permet donc la marche à blanc, en moteur ou en génératrice, à tous les degrés de charge. Aucun rhéostat n'est nécessaire. La mise en marche s'effectue à la main, régulateur débrayé. La mise en phase se fait à la main, si utile, ou au régulateur, et moins d'une minute y suffit. Le régulateur de vitesse a beaucoup d'analogie avec les bons régulateurs de turbines; l'asservissement se fait par pression d'huile et piston-moteur décalant plus ou moins les balais. L'ensemble de ce mécanisme est très robuste.

Chaque groupe porte un levier d'interrupteur pour la mise en circuit ou hors circuit du moteur. Un dispositif de sûreté déclenche l'interrupteur et sort la machine en cas d'emballement ou de marche inversée; on a aussi prévu cet arrêt en cas de „flash over“, mais en général ce dispositif n'est pas utilisé malgré sa simplicité. Un voltmètre placé sur la colonne de l'interrupteur permet de contrôler la puissance fournie par le moteur.

Les connexions entre machines se font par un câble armé logé dans le sous-sol, comme le sont aussi les interrupteurs et sectionneurs. Ces derniers ne permettent pas de couper le circuit général, toujours fermé en boucle. Il n'y a aucun disjoncteur automatique d'intensité sur tout le circuit, aucune coupure n'étant permise ni utile.

Les interrupteurs sont du type dit à huile, leur enveloppe est à la terre, ils sont disposés de telle sorte que la charge statique que doivent prendre les machines en prenant contact avec le réseau, ne soit pas instantanée mais graduelle, en la faisant automatiquement passer par un bâtonnet de silicite à grande résistance.

Les charges statiques, du reste, pourraient prendre une valeur dangereuse pour les machines placées en tête de ligne: Une résistance à point neutre relié au bâti

évite radicalement ce danger. Il en est de même pour les génératrices, de telle sorte que chaque machine est construite et isolée pour sa tension individuelle, sans tenir compte du voltage total, ce qui facilite beaucoup leur construction.

Le rendement ordinaire des génératrices et réceptrices est 94%. Nous avons obtenu jusqu'à 96% et le calcul montre que le rendement des unités plus puissantes et meilleur encore.

A Lyon, les réceptrices ont deux induits par bâti. La tension à pleine charge monte à 10 kV par groupe, soit 5 par induit. En marche ordinaire, la tension oscille entre 8 et 9 kV par groupe; le nombre de tours par minute est de 428.

Poste de transformation pour traction.

Le courant haute tension continu 100 à 125 kV pénètre dans la ville de Lyon par câble armé d'une longueur simple de 4 km et qui alimente la station de traction de la rue d'Alsace. Je n'ai rien à dire de particulier; les moteurs datent de 1906 et continuent leur service mieux même qu'au début car ils marchent depuis 1911 à 150 A au lieu de 75 et s'en trouvent bien. Leur marche est très tranquille. Vitesse: 428 tours/min.

Le câble armé mérite une mention; il n'a jamais eu de réparations et son degré d'isolement est devenu si haut qu'il est impossible de le mesurer. Après plusieurs heures de court-circuit entre âme et enveloppe, la charge statique n'est pas épuisée et le galvanomètre accuse un *débit* chargeant la batterie d'essai (500 V). Ce résultat est remarquable, d'autant plus que des esprits chagrins avaient prévu que l'électrolyse le mettrait promptement hors de service; or, depuis 24 ans aucun signe d'électrolyse n'apparaît, elle y met du temps!

En conclusion, l'expérience acquise à Lyon démontre que le courant continu à haute tension et intensité constante peut être transmis sans faute par câble armé et utilisé avec succès pour la commande soit des alternateurs, soit des génératrices de traction.

Quelques détails sur les dispositions rendues nécessaires pour la mise en série de plusieurs unités à haute tension.

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler ici les moyens employés pour assurer la bonne tenue des isolements des enroulements des génératrices et réceptrices lorsque la tension totale est très élevée. On m'a souvent demandé si ces machines n'étaient pas très difficiles à isoler eu égard à la tension totale.

Ce serait en effet le cas si l'on n'avait pas un sûr moyen d'affranchir les dynamos du voltage total. Je ne saurais pour ma part comment isoler des enroulements pour une tension supérieure à une vingtaine de kV sans sacrifier largement sur le coût et le rendement des machines, sans parler d'inévitables accidents.

Aussi, dès ma première étude (1888), j'avais prévu la difficulté et réalisé l'année suivante les principales dispositions de sécurité nécessaires.

Quatre dispositions sont prises conjointement:

1^o *Isolement parfait des bâtis* des machines d'avec le sol, et isolement superficiel de celui-ci en vue de la protection du personnel.

2^o *Réunion du bâti de chaque groupe avec un neutre artificiel.* A cet effet, une résistance de l'ordre du Megohm est prise en dérivation sur les bornes du groupe et son point milieu est connecté au bâti.

3^o *Isolement très fort, au mica pur, entre l'arbre et la masse de chaque induit.* Tôles et collecteurs sont ainsi franchement et fortement isolés du bâti. Il en résulte qu'en aucun cas la tension développée par un induit ne peut créer une surtension sur les isolements d'un ou plusieurs autres induits montés sur le même bâti.

4^o *Création d'un neutre sur chaque induit* et liaison directe de ce neutre à la masse des tôles.

L'ensemble de ces dispositions a pour résultat de permettre l'emploi d'isolements normaux pour la construction des machines, sans tenir compte de la tension totale obtenue par le couplage en série des machines.

La meilleure manière de relier les tôles du rotor au point neutre de l'enroulement, est l'emploi du dispositif imaginé en 1894 par le très regretté Dolivo-Dobrowolski pour équilibrer les distributions à 3 fils par 3 bobines de self reliées d'une part aux tôles et d'autre part à 3 points pris à 120° sur le bobinage du rotor. On obtient de la sorte une liaison n'ayant pas une forte résistance ohmique, mais ne laissant passer que le faible courant d'excitation nécessaire. Ce moyen est radical et assure parfaitement l'indépendance des tensions individuelles à supporter par les isolements des enroulements. Une machine donnant 10000 V en continu doit être normalement isolée pour sa tension alternative étoilée (c. à. d. 3540 V entre bobinage et masse) quoique branchée en série sur un circuit de plus de 100 kV. Les variations habituelles de l'isolation des bâtis à la terre restent alors sans influence sur les isolements des enroulements.

L'isolation du bâti d'avec le sol doit être absolument certain; cela est de première nécessité. Il ne serait pas aisément à obtenir si la nature ne nous fournissait pas abondamment une matière parfaitement appropriée; l'asphalte et le bitume, dont le pouvoir isolant est très élevé. Comme il est loisible de réserver l'espace nécessaire, on arrive sans difficultés à réaliser le meilleur isolation désirable. Les socles de béton armé reposent sur un nombre suffisant de blocs imprégnés à chaud, de 15 à 20 cm de hauteur, et noyés ensuite dans une épaisse couche d'asphalte coulée bien chaude. Le groupe est ensuite monté sur son massif à la manière ordinaire et il ne reste qu'à recouvrir le sol de l'usine de 3 couches successives d'asphalte pour la protection du personnel, puis d'un carrelage ou d'un linoléum.

Isolation d'avec la turbine. Jusqu'ici nous avons utilisé un manchon imaginé à l'origine par Raffard et que nous avons adapté à la transmission série. Chaque demi-manchon porte une série de doigts reliés en zigzag par une simple courroie. Le cuir sec s'est révélé comme excellent isolant. Sa solidité bien connue permet de calculer les dimensions à admettre et il ne reste plus qu'à respecter largement les distances nécessaires, tout en évitant les angles vifs. Nous n'avons pas eu d'ennuis de ce côté. Mais une protection est ici à sa place sous forme d'une barrière amovible empêchant le personnel d'entrer en contact simultané avec la terre et la dynamo.

Mr. Belli a imaginé un autre type de couplage semblant meilleur encore au point de vue de la protection du personnel, parce qu'il éloigne suffisamment la dynamo de la turbine. Je regrette qu'il n'ait pas été adopté jusqu'ici et souhaite qu'il soit bientôt soumis à l'épreuve de la pratique.

Isolation des instruments de mesure. Une usine série ne comporte aucun tableau général, sauf un panneau réservé aux enregistreurs et compteurs en même temps qu'à un ampèremètre-étalon et un voltmètre. Si le point neutre ou l'un des pôles d'une usine est mis à la terre, ces instruments sont insérés en cet endroit et restent au potentiel de la terre. Sinon, le panneau et le sol sont isolés de la terre comme les machines.

Chaque unité génératrice ou réceptrice comprend une colonne de manœuvre fixée sur son propre bâti. Autant que se peut, les instruments montés sur cette colonne (voltmètre et ampèremètre) sont branchés sur le neutre du groupe et sont donc équipotentiels avec le bâti. C'est chose normale pour les groupes habituels à deux induits. En cas contraire, les instruments sont mis hors de portée de la main.

Danger de contact des enroulements à la main. Ordinairement les enroulements du stator sont branchés sur le neutre du groupe et peuvent être touchés à la main sans danger. Il n'en est pas de même pour les groupes à 3 induits de Mr. Belli. Mais dans ces machines modernes complètement encartées, l'accès à la main des

parties à haute tension est impossible. Seul le collecteur et ses balais sont accessibles, mais aucun accident n'en est résulté jusqu'ici, quoique le collecteur soit essuyé de temps à autre en pleine marche; une simple latte en bois y suffit, sans aucun danger. Du reste, les deux pôles sont très écartés l'un de l'autre et il est difficile de les atteindre simultanément. Le contact d'un pôle est sans danger, mais donne cependant un avertissement, car un courant de l'ordre d'un centième d'ampère, tel qu'on peut le recevoir dans ce cas, est sensible à la main.

Un danger plus grand pourrait résulter du pont-roulant de l'usine. On l'évite en remplaçant les chaînes des commandes à main par des cordes. Les machines en état de montage, de démontage ou de nettoyage sont toujours préalablement mises à la terre après isolement du circuit par leur sectionneur et leur interrupteur.

La nécessité d'isoler les bâtis et le personnel ne constitue donc pas une difficulté sérieuse. Toute sécurité peut être obtenue à la seule condition que l'espace ne soit pas trop ménagé autour des machines, afin qu'un homme ne puisse accidentellement faire pont entre la terre et le matériel sous tension.

En général, on ne rencontre guère aujourd'hui que des ingénieurs très au courant des dangers du courant alternatif, mais n'ayant pas eu l'occasion de se familiariser avec la haute tension continue et qui ne peuvent facilement comprendre qu'il n'est pas dangereux de rester en contact permanent et direct avec du matériel chargé à plus de 100 kV. C'est pourtant le cas habituel au Moûtiers-Lyon; les hommes de service manœuvrent les machines, surveillent à la main les paliers, etc., sans souffrir aucunement de la haute tension à laquelle ils sont chargés. Tout au plus, leurs cheveux se dressent-ils comme des électroscopes et c'est tout.

— Si une personne venant du dehors, étant donc au potentiel de la terre, vient rapidement prendre contact à la main avec une machine à haut potentiel, elle est avertie de cette tension par une inoffensive étincelle de charge qui la surprend et l'amuse. Mais si elle reste un court instant au voisinage immédiat du groupe elle prend la charge par le sol plus ou moins conducteur à sa surface et dès lors elle peut manipuler une machine sous haut potentiel sans se douter de celui-ci. Le personnel, au bout de peu de temps, n'y prend plus garde et évite instinctivement l'étincelle de charge en touchant du bout du pied le massif avant de porter la main sur la machine.

Mises en service ou hors service des machines.

Elles se font toujours au potentiel 0 sans aucune étincelle à l'interrupteur. Il suffit, pour mettre en circuit une génératrice, de l'amorcer préalablement en court-circuit et à l'ampérage de régime. La tension aux bornes est alors zéro et la machine peut être insérée sans autre. A l'arrêt, de même, on réduit le voltage à zéro et l'on court-circuite le groupe tout en l'isolant du circuit.

Il n'en est pas tout à fait de même pour la mise en circuit d'un moteur. L'interrupteur normal est interconnecté avec un deuxième interrupteur de court-circuit, dont les contacts sont des blocs de charbon. L'étincelle due à la résistance ohmique et à la self de la machine s'établit entre les deux charbons; on évite ainsi tout étincelage aux contacts de l'interrupteur à huile. — Pour l'arrêt, on a intérêt à ramener le voltage à zéro avant de court-circuiter, en ramenant les balais sur la ligne neutre.

Les interrupteurs à huile ne souffrant d'aucune étincelle, restent indéfiniment en parfait état.

Emploi de la terre comme conducteur effectif.

Quelques mots encore sur ce chapitre de haute importance économique et technique.

Jusqu'ici, malgré l'expérience tout à fait décisive faite pendant 10 000 heures (417 jours de service ininterrompu) à Lausanne en 1909—10, la terre n'a jamais été utilisée régulièrement comme conducteur efficace, ceci uniquement par suite

de décisions gouvernementales, à mon sens injustifiées. Et pourtant rien ne s'y oppose en continu.

Le service entier de distribution de l'énergie pour lumière et force (triphasé) et traction de la ville de Lausanne a été assuré par un seul conducteur aérien de 56 km et 22000 V et retour par le sol pendant plus d'un an.

Aucun incident d'exploitation n'en est résulté, à part un fâcheux accident de personne, tout à fait exceptionnel, et dont le système n'est pas responsable. Fait remarquable, on a passé les saisons orageuses sans aucun fonctionnement de parafoudre, contrairement à l'habitude. En un mot, du point de vue exploitation comme du point de vue technique, l'utilisation de la terre s'est montrée ce qu'elle est nécessairement: très avantageuse.

La résistance totale des deux terres a été en moyenne de $1,76 \Omega$ et les prises de terre se sont bien comportées.

Aussi l'autorisation d'utiliser la terre comme conducteur effectif a-t-elle été envisagée pour le Moûtiers-Lyon, car elle aurait réduit de moitié les pertes de la ligne et économisé la moitié du matériel de celle-ci. Cette autorisation a été refusée par l'administration. La question est restée à l'étude dans l'idée de la reprendre lorsque le développement du transport d'énergie l'aurait rendue opportune. Rappelons ici que dans toutes les grandes villes l'intensité du courant de retour dans les installations de tramways atteint des milliers d'ampères, alors que pour le Moûtiers-Lyon il ne s'agirait que de 150 A.

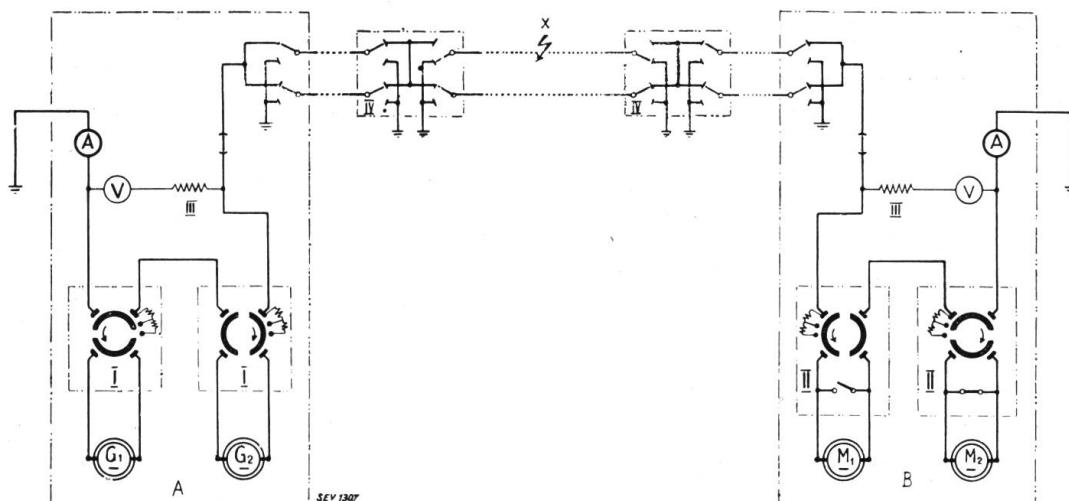


Fig. 3.

Schéma général d'une installation de transport d'énergie sous forme de courant continu à haute tension, en utilisant la terre comme conducteur.!

- A Station génératrice
- B Station réceptrice
- I Interrupteur
- II Interrupteur verrouillé avec un court-circuïteur
- III Résistance-série du voltmètre (côté opposé à la terre)
- IV Poste de sectionnement
- X Défaut.

Conclusions.

Ainsi les problèmes posés par l'utilisation du courant continu à haute tension ont pu être solutionnés assez convenablement pour que son emploi ait pu devenir pratique. Les possibilités offertes pour les transports à très grande distance sont ainsi démontrées. Je ne veux pas dire par là que le système ne soit plus perfectible; bien au contraire, j'estime qu'il reste encore un long chemin à parcourir et je souhaite que ce soit l'œuvre de demain. Je serais heureux que ce modeste exposé puisse contribuer à encourager nos jeunes ingénieurs à suivre cette voie qui, peut-être, sera très fructueuse.